

汾河流域下游不同土地利用方式下优先流区与基质流区土壤团聚体稳定性分析

任泽莹¹, 赵勇钢¹, 吕银彦², 尚月婷³, 王永彬⁴, 韩乐乐¹, 刘小芳¹

(1.山西师范大学 生命科学学院, 山西 临汾 041000; 2.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘要:优先流是水分和溶质在土壤中非均质性运移的普遍现象,但对其形成的优先流区和基质流区土壤团聚体稳定性的研究还较少。为了阐明土壤团聚体破碎机制的差异,研究以汾河流域下游农田、撂荒地和果园 3 种土地利用方式为对象,采用野外染色示踪法与 Le Bissonnais(LB)法分析了土壤染色区分下优先流区与基质流区土壤团聚体稳定性特征。结果表明:土壤染色率主要分布在 0—30 cm 土层,在 10—30 cm 土层果园显著高于撂荒地。LB 处理的 >0.25 mm 团聚体含量和平均重量直径(MWD)在不同土地利用方式下表现为果园>农田>撂荒地,相对消散指数(RSD)和相对机械破碎指数(RMI)则有相反的趋势。优先流区在 10—20 cm 土层比基质流区具有更强的团聚体稳定性以及抵抗消散作用和机械破坏能力。土壤染色率与快速湿润的 MWD 呈显著负相关,与 RSI 呈显著正相关。研究表明果园比农田和撂荒地具有更好的优先流特征和团聚体稳定性,并且优先流区抗团聚破碎能力比基质流区更强,这将有利于维持优先流途径稳定性。

关键词:土壤物理学; 优先流; 染色示踪法; Le Bissonnais 法; 团聚体稳定性

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0059-06

Analysis on Soil Aggregate Stability of Preferential Flow and Matrix Flow Domains Under Different Land Use Types in the Lower Reaches of Fen River Watershed

REN Zeying¹, ZHAO Yonggang¹, LÜ Yinyan², SHANG Yueting³,
WANG Yongbin⁴, HAN Lele¹, LIU Xiaofang¹

(1.School of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China;

2.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 4.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: Preferential flow is a common heterogeneous phenomenon of movement of water and solute in soil. However, the difference of soil aggregate stability between preferential flow domain and matrix flow domain are still unclear. In order to clarify the difference of soil aggregate fragmentation mechanism, soil dyeing percentage and aggregate stability in preferential flow and matrix flow domain were analyzed by using dye tracer in field and Le Bissonnais (LB) method in this study. The results showed that soil dyeing percentage mainly distributed in 0—30 cm soil depth, and orchard had a significantly higher values than abandoned land in 10—30 cm depth; the macro-aggregate (>0.25 mm) content and mean weight diameter (MWD) with LB treatments had similar change trends in the order; orchard>farmland>abandoned land, while the relative slaking index (RSI) and relative mechanical breakdown index (RMI) had the opposite tendency; in 10—20 cm soil depth, the preferential flow domain had stronger aggregate stability and resistance to slaking and mechanical breakdown than the matrix flow domain; soil dyeing percentage was negatively correlated with MWD and

收稿日期:2021-08-16

修回日期:2021-10-01

资助项目:国家自然科学基金项目“黄土丘陵区植物根系与土壤大孔隙对优先流的影响”(42007064)

第一作者:任泽莹(1997—),女,山西太谷人,硕士研究生,研究方向为水土资源高效利用。E-mail:923804628@qq.com

通信作者:赵勇钢(1980—),男,湖南永州人,博士,副教授,主要从事旱区生态修复与水土资源高效利用。E-mail:zhaoyg@sxnu.edu.cn

positively correlated with RSI. These results suggest that orchard had better preferential flow characteristics and aggregate stability than farmland and abandoned land, and the resistance to aggregates slaking and mechanical breakdown of preferential flow domain was stronger than that of matrix flow domain, which was beneficial for maintaining the stability of preferential flow path.

Keywords: soil physics; preferential flow; dye staining; Le Bissonnais method; soil aggregate stability

土壤优先流是水分和溶质通过根孔、动物活动通道、土壤裂隙和孔隙等优先路径而发生的非平衡流过程,是土壤中普遍存在的现象^[1]。由于优先流使部分水和溶质快速流到下层,因此对土壤水分储存与利用、径流形成、坡面稳定性、深层水质污染等方面具有重要影响^[2-3]。土壤优先流运移具有的非均质性与传统的均质土壤水运动机制差异较大,加之气候、土地利用方式、土壤等众多因素对土壤异质性的影响,对其运移机制的揭示仍存在困难^[3]。土壤优先流常采用染色示踪法进行测定,并根据是否染色可分为染色区域的优先流区和未染色区域的基质流区^[4-5]。目前对两个区域土壤性质与优先流特征关系的研究仍需进一步明确^[6-7]。

土壤团聚体稳定性是影响水分入渗的重要指标^[8]。在灌溉或降雨条件下,土壤团聚体会破碎后释放出单粒、微团聚体等小颗粒物质,会堵塞土壤孔隙,从而降低水分入渗,增加地表径流,引起水土流失。土壤团聚体破碎机制主要有非均匀膨胀作用、消散作用、雨滴打击作用和物理化学分散作用 4 个方面^[9]。据此,Le Bissonnais^[9]提出了包括快速湿润(fast wetting,FW)、慢速湿润(slow wetting,SW)和预湿后扰动(wet stirring,WS)3种处理的团聚体稳定性分析方法(简称LB法),以区分消散作用、黏粒膨胀和机械打击对团聚体的破坏机制,现已成为ISO标准,并广泛用于评价团聚体稳定性与土壤结皮和侵蚀的关系。已有一些研究应用LB法对黄土高原地区不同土地利用和植被类型的团聚体稳定性差异与破碎机制进行了研究^[10-13]。但目前应用LB法对土壤优先流和团聚体稳定性关系的研究较少。本研究以汾河流域下游农田、撂荒地和果园3种土地利用方式为对象,通过野外亮蓝染色示踪法分析土壤染色率,运用LB法测定优先流区与基质流区的土壤团聚体分布及其稳定性特征,阐明土壤团聚体破碎机制的差异,以期为区域土壤功能评价和水土资源高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在位于汾河流域下游的山西省临汾市尧

都区进行。汾河是黄河第二大支流,汾河下游流域位于 $110^{\circ}30' - 112^{\circ}34'E, 35^{\circ}20' - 36^{\circ}57'N$,面积 $11\ 276\ km^2$,海拔 $360 \sim 500\ m$ 。区域属温带大陆性季风气候,雨热同季,年平均降雨量为 $538.6\ mm$,70%以上的降水集中在6—9月,年均蒸发量 $1\ 120\ mm$ 。区域主要土壤类型为浅褐土,具有弱碱性及明显的钙化作用和粘化作用。该区域是山西省重要的粮食生产区,同时也是主要的人口聚集区和工业区。土地利用类型主要有大量的农田、人工种植的乔木和果园以及部分的撂荒地。

1.2 试验设计与测定

1.2.1 试验设计与样品采集 2018年8月在临汾市尧都区加泉村选取农田、撂荒地和果园3种土地利用方式为研究样地。农田采用作物为冬小麦-夏玉米的轮作方式,种植方式以机械耕种为主,作物行距 $20\ cm$,种植年限大于 $70\ a$ 。撂荒地的撂荒时间为 $4\ a$,之前为农田,种植年限超过 $30\ a$ 。果园种植的是苹果树,其种植年限超过 $10\ a$ 。

1.2.2 野外染色示踪试验与图片分析 在每种土地利用方式中随机选择条件相近的3块样方($10\ cm \times 10\ cm$)作为3个重复,采用野外亮蓝染色示踪法分析土壤染色率(图1A)。试验前小心清理地面较大枯枝和石块,将长宽均为 $45\ cm$ 、高 $25\ cm$ 的铁框砸入土壤中 $20\ cm$,并捣实铁框内壁 $5\ cm$ 以内的土壤。参考当地降雨资料,将 $25\ L$ 浓度为 $5.0\ g/L$ 的亮蓝溶液倒入铁框内土壤中,盖上塑料薄膜。24 h后揭开塑料薄膜,在铁框四周向下挖掘土壤,小心取出铁框。以 $10\ cm$ 为间隔向下进行横向剖面挖掘,直到染色优先区较少为止,每个重复的染色试验共挖掘至 $0 - 40\ cm$ 土层。每个横向剖面挖掘后,用小刀和软毛刷小心修平,用数码相机进行拍照。利用Photoshop CS6对拍摄的染色图像进行几何校正,裁取位于图像中间长宽均为 $40\ cm$ 的区域作为分析区域。调整图像的色相、饱和度和亮度以使图像的染色区与未染色区颜色对比鲜明。采用Image J1.48软件,通过阈值调整,使图像变为染色区为黑色、没有染色区为白色的二值图像(图1B)。利用软件的Particles功能计算出染色区面积,从而计算得到土壤染色率。

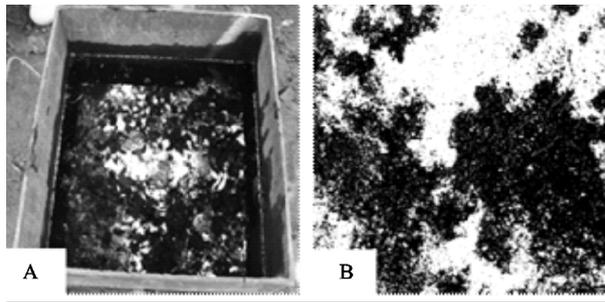


图 1 不同土地利用方式下样地染色示踪试验(A)和阈值调整的二值图像(B)

1.3 土壤样品采集与分析

对每个横向剖面染色的优先流区和没有染色的基质流区取原状土样。土样带回实验室后,去除杂物后,风干过筛后待测。土壤团聚体稳定性采用修改后 LB 法进行测定^[9,14]:分别称取 5 g 在 40℃ 烘干至恒重的 3~5 mm 团聚体,进行快速湿润(FW)、慢速湿润(SW)和预湿后扰动(WS)处理。3 种处理的区别在于,FW 处理是土样直接浸入蒸馏水中,SW 是土样放置在海绵上的滤纸上并用 95% 乙醇进行湿润,WS 则是土样用 95% 乙醇浸泡后转入有蒸馏水的锥形瓶中摇晃。上述操作完成后,各处理均用 95% 乙醇将土样洗入筛径为 2,1,0.5,0.25,0.053 mm 的套筛中,将套筛在 95% 乙醇中振荡后,随后将各筛上的土样冲洗入烧杯内,在 105℃ 烘至恒重,获得各级团聚体的质量分数。土壤团聚体稳定性采用平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、相对消散指数(relative slaking index, RSI)和相对机械破碎指数(relative mechanical breakdown index, RMI)等指标进行评价,计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i \omega_i \quad (1)$$

$$RSI = \frac{MWD_{SW} - MWD_{FW}}{MWD_{SW}} \quad (2)$$

$$RMI = \frac{MWD_{SW} - MWD_{WS}}{MWD_{SW}} \quad (3)$$

式中: x_i 为第 i 级的团聚体平均直径(mm); ω_i 为第 i 级团聚体重量百分含量, MWD_{SW} , MWD_{FW} 和 MWD_{WS} 分别表示 SW, FW 和 WS 处理的公式(1)计算结果。

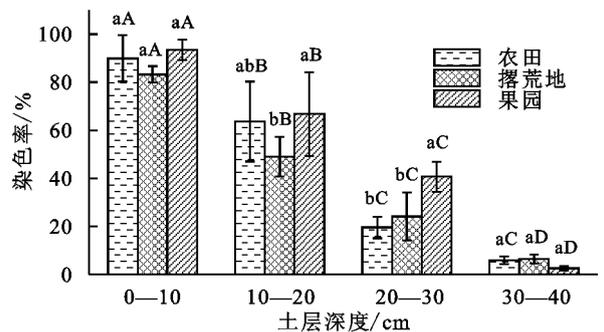
1.4 数据处理与分析

利用双因素方差分析不同土地利用类型和深度对土壤染色率的影响,分析不同土地利用类型和染色区域对土壤团聚体稳定性指标的影响,采用最小显著性差异法(显著性水平为 0.05)进行多重比较。利用 Pearson 相关分析法分析土壤团聚体稳定性指标与染色率的相关性。所有数据统计分析利用 SPSS 18.0 软件完成,绘图采用 Origin 9.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 土壤染色率

土地利用方式土壤染色率在 0—10, 30—40 cm 土层没有显著性差异($p > 0.05$),但在 10—20, 20—30 cm 土层具有显著性差异,果园比撂荒地显著要高($p < 0.05$)。不同土层间的染色率具有显著差异($p < 0.05$),并随着土层深度的增加呈降低的趋势。土壤染色率在 0—30 cm 土层具有较大值(19.57%~93.51%),而在 30—40 cm 土层则较低(2.53%~6.41%)。说明 3 种不同土地利用方式下的优先流主要发生在 0—30 cm 土层。



注:不同小写字母表示不同土地利用类型间差异显著,不同大写字母表示不同土层间差异显著($p < 0.05$)。

图 2 不同土地利用方式下土壤染色率

2.2 土壤团聚体分布

LB 这 3 种处理下 > 0.25 mm 大团聚体含量总体表现为 $SW > WS > FW$,并随着土层深度增加而降低(图 3)。SW 处理下不同土层团聚体含量均以 > 2 mm 为主(76.5%~92.8%)。FW 处理下 > 2 mm 团聚体含量较低(0.4%~6.0%),0.25~0.053 mm 团聚体含量较多(28.9%~55.8%), > 0.25 mm 团聚体含量为 15.4%~44.7%。WS 处理下 > 2 mm 团聚体含量也较高(36.3%~78.1%), > 0.25 mm 团聚体含量为 84.0%~95.3%。总体上,LB 各处理下的大团聚体含量,在不同土地利用类型中果园最高而撂荒地最低,在不同优先流区域中优先流区要大于基质流区。

2.3 土壤团聚体稳定性指标

LB 方法 3 种处理的 MWD 值表现为 $SW(1.65 \sim 1.92 \text{ mm}) > WS(0.18 \sim 0.38 \text{ mm}) > FW(1.21 \sim 1.79 \text{ mm})$,且随着土层深度增加而降低(图 4)。MWD_{SW} 在 3 种土地利用类型间以及优先流和基质流区间均无显著性差异($p > 0.05$)。除了 10—20 cm 基质流区的 MWD_{FW} 外,各土地利用类型间的 MWD_{FW} 和 MWD_{WS} 值在其他土层和优先流区域均有显著性差异。果园的 MWD_{FW} 和 MWD_{WS} 值要较其他样地高,撂荒地最低。优先流区和基质流区 MWD_{FW} 值的显著差异存在于 10—20 cm 土层各土地利用类型以及 20—30 cm 土层果园和农地, MWD_{WS} 值的显著差异

仅存在于 10—20 cm 土层撂荒地。优先流区的 MWD_{FW} 和 MWD_{WS} 值要高于基质流区。

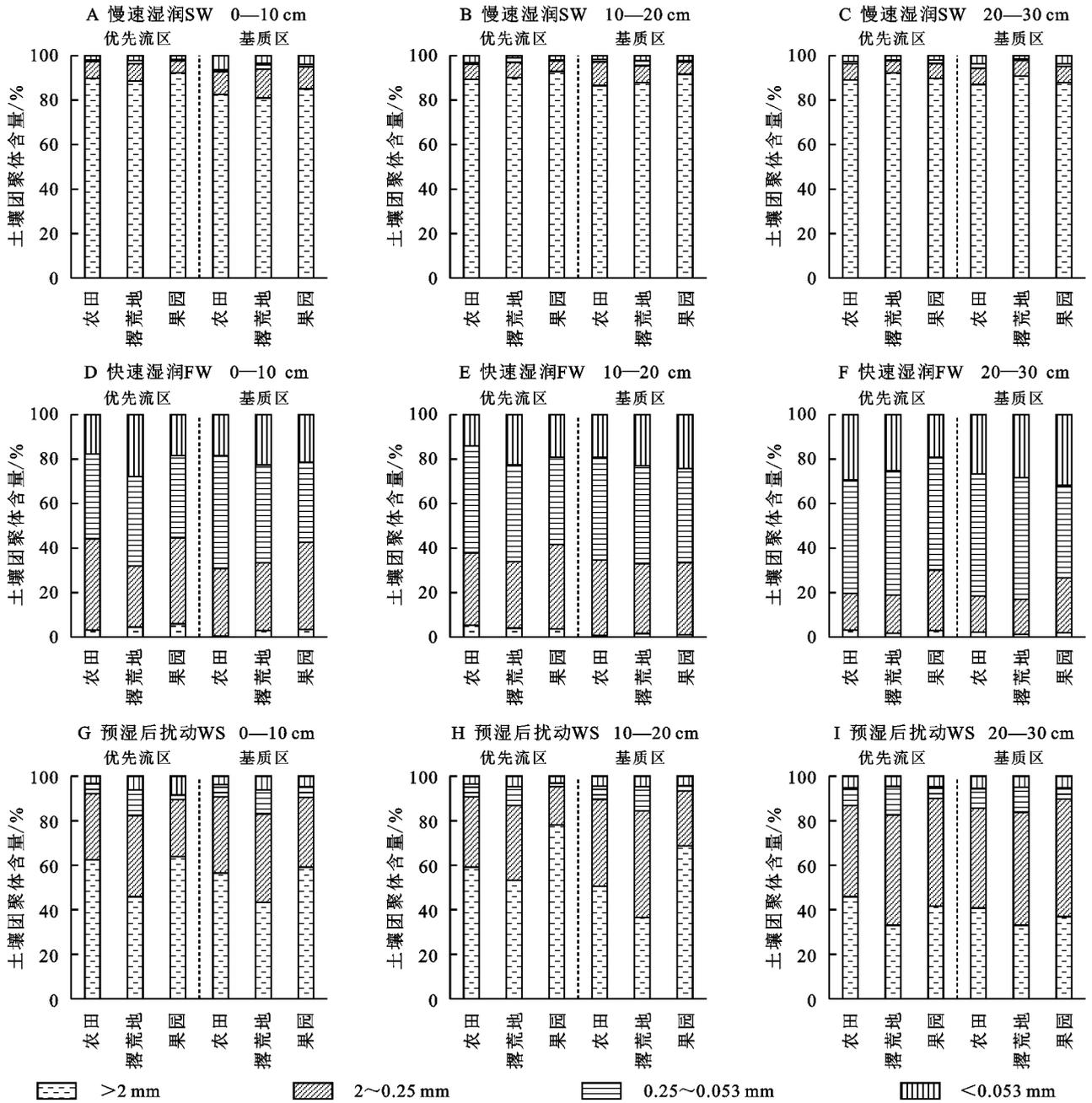


图3 Le Bissonnais法3种土地利用方式优先流区和基质流区土壤团聚体分布

RSI 和 RMI 值的变化趋势与 MWD 值相反, 总体随土层深度增加而增大。除了 10—20 cm 基质流区的 RSI 值外, 各土地利用类型间的 RSI 和 RMI 值在其他土层和优先流区域均有显著性差异。撂荒地的 RSI 和 RMI 值具有最大值, 果园则有较低值。优先流区和基质流区 RSI 值的显著差异存在于 10—20 cm 土层各土地利用类型以及 20—30 cm 土层果园, RMI 值的显著差异仅存在于 10—20 cm 土层撂荒地。优先流区的 RSI 和 RMI 值要高于基质流区。

2.4 土壤优先流与土壤性质的相关性

土壤染色率与 FW 处理的 MWD 呈显著负相关, 与 RSI 呈显著性正相关(表 1)。SW 处理的

MWD 与其他指标均无显著相关性。FW 和 WS 处理的 MWD 与 RSI 和 RMI 呈显著性负相关。

3 讨论

本研究不同土地利用方式中, 果园的土壤染色率、 >0.25 mm 团聚体含量和 MWD 值要优于其他两者, 撂荒地最低。不同土地利用方式土壤优先流的通道及团聚体稳定性差异的影响因素并不相同。农田土壤染色率和团聚体稳定性与农田耕作方式、肥料投入、作物种植及秸秆返田等多因素有关^[15-17]。本研究农田样地以机械耕作为主, 对下层(>20 cm)土壤较少翻耕, 虽有化肥施入和少量秸秆返田, 致使土壤

下层染色率和团聚体稳定性并不高。撂荒地较低的团聚体稳定性,可能是由于在农地撂荒初期,植被覆盖度较低,有机质输入较低,土壤受降水打击消散作用影响,表层土壤易形成结皮,容重较大,孔隙度较低,大团聚体形成及稳定性较差。果园较高的染色率和团聚体稳定性,可能与根系在较深土层的分布有关。根系更新及其形成的孔隙对团聚体胶结物质的输入以及水流通道形成有重要作用^[18-19]。

本研究中优先流区与基质流区 FW 和 WS 处理的 MWD,RSI 和 RMI 值在 10—20 cm 土层存在显著差异,说明优先流区土壤团聚体稳定性高于基质流区。这种差异可能与优先流区与基质流区土壤理化性质、根系等状况有关^[4,6]。一些研究表明,优先流区非毛管孔隙度和总孔隙度比基质流区的大^[5,7],染色区土壤饱和含水量、毛管持水量和田间持水量高于未染色区,染色区土壤容重低于未染色区^[7]。与基质流区相比,优先流区较大的孔隙度和根系量,这有利于有机胶结物质积累、微生物的活动等,从而影响大团聚体的形成,提升团聚体稳定性。

LB 方法的 3 种处理可以指示不同的团聚体主要破碎机制,SW 处理强调黏粒膨胀引起的团聚体破碎,FW 处理强调团聚体快速浸没后封闭气体爆破产生的消散作用,WS 处理强调团聚体机械振荡后的破碎作用^[9]。本研究中 SW 处理下各样地均无显著性差异,说明较少水分条件(如小雨、少水量灌溉等)下土壤湿润或黏粒膨胀并不是团聚体破碎的主要作用。与 WS 处理相比,FW 处理的 >0.25 mm 团聚体含量和 MWD 值更低,说明短时大量水分条件(如暴雨、大水量灌溉等)下产生的消散作用是团聚体破碎的主要机制。对黄土高原地区不同植被类型^[13-14]、植被区与坡向^[12]的研究中也表明消散作用和机械扰动是团聚体破碎的主要机制。RSI 和 RMI 的结果也说明优先流区抵抗消散所用及机械打击破坏的能力要较基质流区强,这将对维持土壤孔隙状况及优先流运移路径的稳定性具有重要作用。

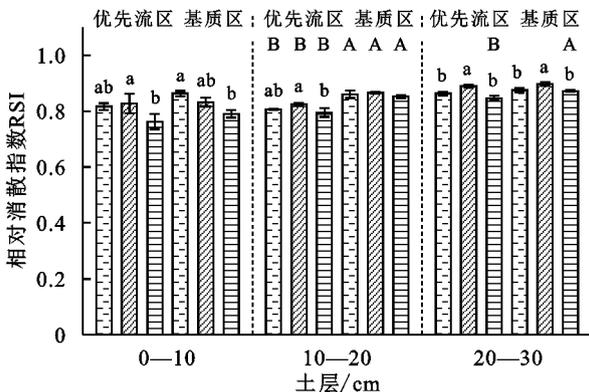
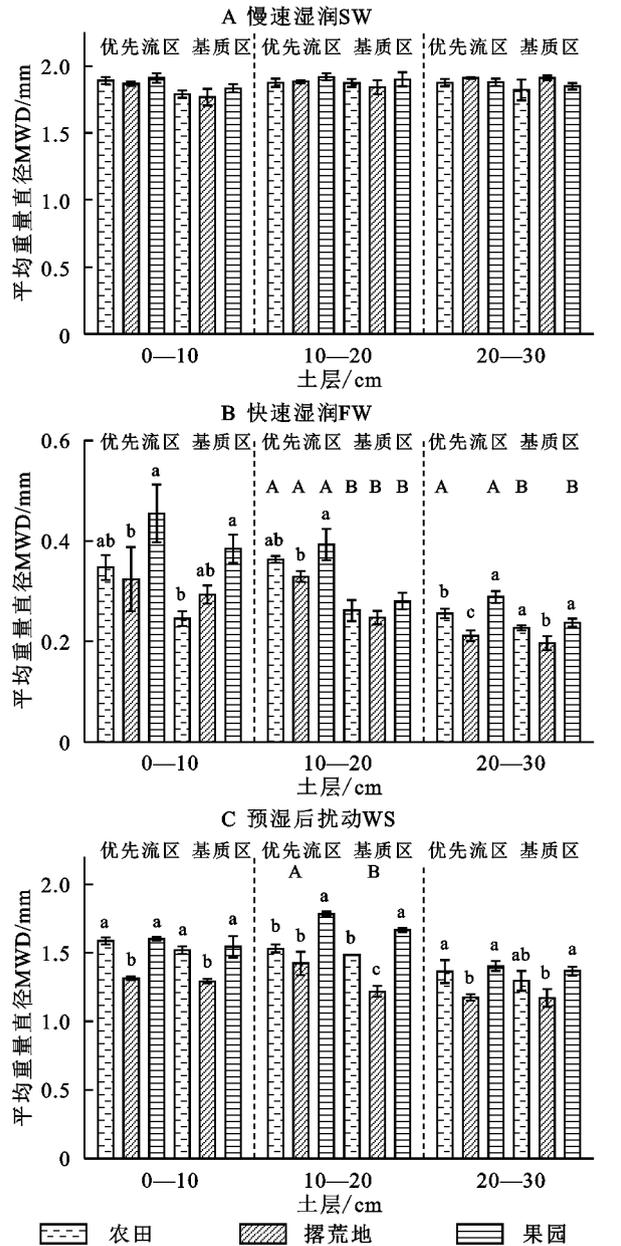


图 5 3 种土地利用方式优先流区和基质流区土壤相对消散指数 (RSI) 和相对机械破碎指数 (RMI)



注:不同小写字母表示同一土层同一优先流区域不同土地利用类型间差异显著,不同大写字母表示同一土层同一土地利用类型不同优先流区域间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 4 Le Bissonnais 法测定的 3 种土地利用方式优先流区和

基质流区土壤 MWD 值

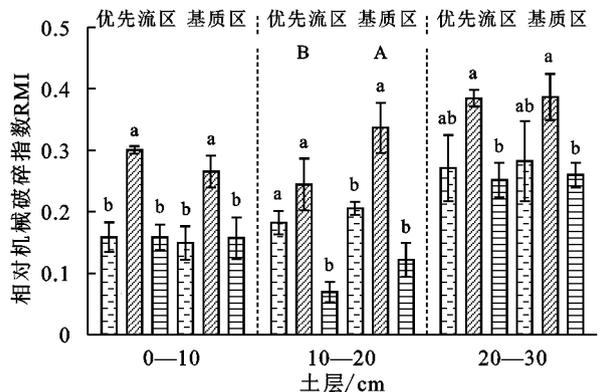


图 5 3 种土地利用方式优先流区和基质流区土壤相对消散指数 (RSI) 和相对机械破碎指数 (RMI)

表 1 土壤染色率与团聚体稳定性指标的相关性

项目	染色率	MWD _{SW-P}	MWD _{SW-M}	MWD _{FW-P}	MWD _{FW-M}	MWD _{WS-P}	MWD _{WS-M}	RSI _P	RSI _M	RMI _P
MWD _{SW-P}	-0.31									
MWD _{SW-M}	-0.15	0.34								
MWD _{FW-P}	-0.49**	0.18	-0.05							
MWD _{FW-M}	-0.48**	0.18	-0.14	0.75**						
MWD _{WS-P}	-0.36	0.07	-0.11	0.63**	0.39*					
MWD _{WS-M}	-0.34	0.21	-0.06	0.67**	0.44*	0.88**				
RSI _P	0.43*	-0.10	0.34	-0.71**	-0.98**	-0.38*	-0.42*			
RSI _M	0.47*	-0.10	0.08	-1.00**	-0.74**	-0.63**	-0.66**	0.71**		
RMI _P	0.30	0.10	0.17	-0.59**	-0.36	-0.99**	-0.84**	0.36	0.61**	
RMI _M	0.26	-0.08	0.39*	-0.62**	-0.45*	-0.84**	-0.94**	0.49**	0.63**	0.83**

注: * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$; 下标 P 和 M 分别表示优先流区和基质流区。

4 结论

汾河流域 3 种土地利用方式(农田、撂荒地、果园)下土壤染色率随土层深度增加而降低,且在 10—30 cm 土层存在显著性差异。LB 方法测定的 > 0.25 mm、MWD 值表现为果园 $>$ 农田 $>$ 撂荒地的趋势,RSI 和 RMI 则有相反的趋势,表明果园具有较好的团聚体稳定性以及抗消散作用和机械破碎能力。优先流区抗消散作用及机械破碎能力要优于基质流区,两者团聚体稳定性的差异主要在 10—20 cm 土层。土壤染色率与 FW 处理的 MWD 呈显著负相关,与 RSI 呈显著性正相关。

参考文献

- [1] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils revisited[J]. *Water Resources Research*, 2013,49(6):3071-3092.
- [2] Allaire S E, Roulier S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils:A review of different techniques[J]. *Journal of Hydrology*, 2009,378(1):179-204.
- [3] 牛健植,余新晓,张志强.优先流研究现状及发展趋势[J].*生态学报*,2006,26(1):231-243.
- [4] Wang R, Dong Z, Zhou Z, et al. Temporal variation in preferential water flow during natural vegetation restoration on abandoned farmland in the Loess Plateau of China [J]. *Land*, 2019, 8 (12): doi. org/10. 3390/land8120186.
- [5] 杜晓晴,牛健植,侯琨,等.华北土石山区优先流区与基质流区土壤特性分析[J].*中国水土保持科学*,2015,13(3):51-57.
- [6] Jiang X, Zakari S, Wu J, et al. Can complementary preferential flow and non-preferential flow domains contribute to soil water supply for rubber plantation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020,461:117948.
- [7] 王赵男,辛颖,赵雨森.黑龙江省水源地优先流区与基质流区土壤特性分析[J].*水土保持学报*,2017,31(1):49-54.

- [8] 赵勇钢,赵世伟,曹丽花,等.半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响[J].*农业工程学报*,2008,24(6):14-20.
- [9] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology [J]. *European Journal of Soil Science*, 1996,67(1):425-437.
- [10] Zeng Q, Darboux F, Man C, et al. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau(China) [J]. *Catena*, 2018,167:276-283.
- [11] An S, Darboux F, Cheng M. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau(China) [J]. *Geoderma*, 2013,209/210:75-85.
- [12] 李娅芸,刘雷,安韶山,等.应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区不同植被区及坡向对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J].*自然资源学报*,2016,31(2):287-298.
- [13] 刘雷,安韶山,黄华伟.应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性的影响[J].*生态学报*,2013,33(20):6670-6680.
- [14] 高冉,赵勇钢,刘小芳,等.黄土丘陵区人工柠条种植年限和坡位对土壤团聚体稳定性的影响[J].*生态学报*,2020,40(9):2964-2974.
- [15] 田香姣,程金花,杜士才,等.2 种土地利用方式下的优先流特征[J].*水土保持学报*,2014,28(3):37-41.
- [16] 任荣秀,杜章留,孙义亨,等.华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征[J].*生态学报*,2020,40(19):6991-6999.
- [17] 刘梦云,吴健利,刘丽雯,等.黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响[J].*自然资源学报*,2016,31(9):1564-1576.
- [18] Kodešová R, Němeček K, Žigová A, et al. Using dye tracer for visualizing roots impact on soil structure and soil porous system [J]. *Biologia*, 2015,70(11):1439-1443.
- [19] Zhu X, Chen C, Wu J, et al. Can intercrops improve soil water infiltrability and preferential flow in rubber-based agroforestry system? [J]. *Soil & Tillage Research*, 2019,191:327-339.